

**В.И.БЕЛЫХ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков;

**О.Ф.ПОЛИЩУК**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков;

**К.Б.МЯГКОХЛЕБ**, канд. техн. наук, науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков

## **МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АГРЕГАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕСЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ И ВИБРОУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Запропоновано новий метод оцінки довговічності агрегатів і конструкцій, в основу якого покладена ідея внесення конструктивних доповнень в досліджуваний об'єкт для накопичення експлуатаційних пошкоджень з подальшим проведенням стендових випробувань. Результати досліджень можуть бути використані для вироблення конструкторських і технологічних рекомендацій з підвищення втомного ресурсу виробів, які експлуатуються в умовах динамічного вантаження.

A new method of assessing durability of components and structures, which is based on the idea of making structural additions to the object being studied for the accumulation of operational damage, followed by bench testing. The research results can be used to develop design and technological recommendations for improving the fatigue resource products which are operated under dynamic loading.

**Введение.** Важнейшей задачей в области энергетического машиностроения и в энергетике в целом является увеличение срока эксплуатации оборудования с сохранением основных показателей его надежности.

Большое значение при решении задачи повышения надежности и работоспособности машин, а также при прогнозировании динамической прочности и ресурса энергетического оборудования, работающего в условиях динамического нагружения (действия вибраций и ударов) имеет использование результатов стендовых испытаний и диагностики.

**Постановка проблемы.** Методы расчета долговечности при нерегулярном нагружении основываются на гипотезах накопления усталостных повреждений [1,2]. Чаще всего используется линейная гипотеза суммирования, предполагающая, что, независимо от последовательности действия циклов напряжений разных уровней, вносимые ими повреждения суммируются линейным образом и определяются в относительном виде по обычной кривой усталости

$$\sum_{i=1}^L \frac{n_i}{N_i} = P_i, \quad (1)$$

где  $n_i$  – число циклов данного уровня напряжений;  $N_i$  – разрушающее число

циклов при действии напряжений данного уровня;  $L$  – количество уровней напряжений;  $P_i$  – степень повреждения. Предполагается, что мера повреждения в момент разрушения не зависит от истории нагружения, а суммарное относительное повреждение  $P_i = 1$ .

Традиционным методом расчетной оценки долговечности агрегатов и конструкций является метод тензометрирования [3,4], в результате которого производится запись эксплуатационных вибраций в течении времени  $T_э$ , рассчитывается согласно (1) накопленное повреждение  $P_э$  и в соответствии с пропорцией  $T_э$  соответствует  $P_э$ , а общая долговечность  $T$  соответствует 1, получают

$$T = \frac{T_э}{P_э}. \quad (2)$$

Недостатком данного метода является невозможность его применения для некоторых условий эксплуатации объектов, а также малая достоверность (длительность обрабатываемых осциллограмм составляет несколько минут) при оценке агрегатов с заложенным ресурсом несколько лет.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что в зонах возможных поломок агрегата или конструкции, где в силу эксплуатационных особенностей невозможно установить какой-либо датчик, приваривается или укрепляется болтами несколько контрольных образцов материала конструкции, осуществляют заданный цикл нагружения в условиях эксплуатации. Затем образцы изымают и в лабораторных условиях на вибростенде доводят до разрушения с заданной последовательностью. Количество контролируемых образцов выбирается в соответствии с требованиями достоверности проводимых экспериментов. По данным экспериментальных исследований строят систему из  $n$  уравнений с  $n$  неизвестными и по результатам их решения делают выводы по оценке надежности контролируемого оборудования. Выбор цикла нагружения образцов в условиях эксплуатации определяется заданной достоверностью.

Рассмотрим теоретические аспекты возможности применения внесения конструктивных дополнений, в частности приварки нескольких образцов в зонах действия максимальных эксплуатационных нагрузок с последующим проведением усталостных испытаний, для оценки долговечности.

Кривую усталости материала можно с достаточной точностью описать математическим выражением, например, для стали – степенным уравнением [3]

$$\sigma^m N = \sigma_{-1}^m N_0 = A, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – действующие напряжения;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости;  $N$  – число циклов до разрушения;  $N_0$  – базовое число циклов;  $m$ ,  $A$  – параметры уравнения.

Согласно линейной гипотезе суммирования повреждений, сумму накопленных повреждений в опасной зоне можно представить в виде  $\sum n_i/N_i$  или, исходя из выбранного уравнения кривой усталости (3),

$$n_1 \frac{\sigma_1^m}{A} + n_2 \frac{\sigma_2^m}{A} + \dots + n_i \frac{\sigma_i^m}{A} = 1 \quad (4)$$

в месте первоначальной усталостной поломки.

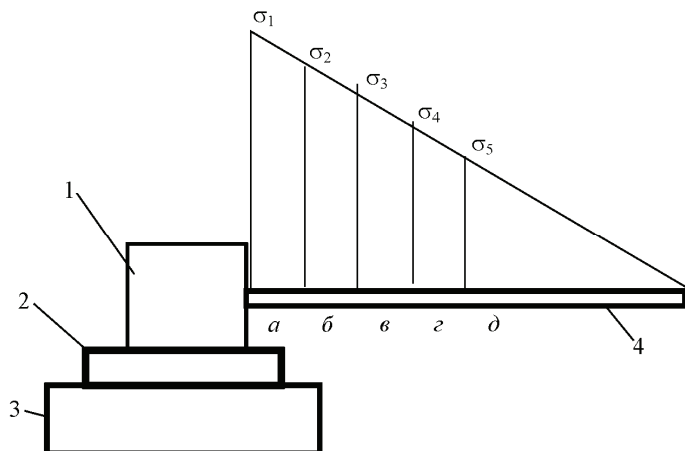


Схема нагружения образца:

1 – крепление; 2 – Подвижная платформа вибростенда; 3 – вибростенд; 4 – образец,  $a, б, в, г, д$  – точки по длине образца, соответствующие напряжениям  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$

Согласно приведенной выше сути предложенного метода внесение конструктивных дополнений осуществляется привариванием или крепежом болтами несколько контрольных образцов из материала конструкции, в зоне максимальных напряжений, определяемой, например, расчетным путем или другими доступными методами, а затем осуществляют заданный цикл нагружения образцов в условиях эксплуатации.

Поскольку в выражении (4)  $\Delta\sigma$  выбирается самими исследователями, то в данном случае предлагается привязать его к длине образца как показано на рисунке. Здесь рассматривается случай построения системы уравнений для определения значений  $n_i$  при  $i = 5$ .

После извлечения образцов из условий эксплуатации, первый образец закрепляют на вибростенде в точке  $a$  и при  $\sigma_{л1}$  за время  $T_{л1}$  доводят до разрушения. Для этого случая выражение (4) примет вид

$$n_{11} \frac{\sigma_1^m}{A} + n_{21} \frac{\sigma_2^m}{A} + \dots + n_{51} \frac{\sigma_5^m}{A} + n_{л1} \frac{\sigma_{л1}^m}{A} = 1. \quad (5)$$

Значение  $n_{li}$  вычисляют исходя из времени до поломки и частоты нагружения  $f$  согласно выражения

$$n_{li} = T_{li} \cdot f. \quad (6)$$

Затем закрепляют второй образец в точке  $б$  и при  $\sigma_{л1}$  за время  $T_{л2}$  дово-

дят до разрушения. Для этого случая выражение (4) примет вид

$$n_{11} \frac{\sigma_2^m}{A} + n_{21} \frac{\sigma_3^m}{A} + \dots + n_{51} \frac{\sigma_5^m}{A} + n_{\lambda 2} \frac{\sigma_{\lambda 1}^m}{A} = 1. \quad (7)$$

Затем закрепляют третий образец в точке *в* и при  $\sigma_{\lambda 1}$  за время  $T_{\lambda 3}$  доводят до разрушения. Для этого случая выражение (4) примет вид

$$n_{11} \frac{\sigma_3^m}{A} + n_{21} \frac{\sigma_4^m}{A} + n_{31} \frac{\sigma_5^m}{A} + n_{\lambda 3} \frac{\sigma_{\lambda 1}^m}{A} = 1. \quad (8)$$

Затем закрепляют четвертый образец в точке *г* и при  $\sigma_{\lambda 1}$  за время  $T_{\lambda 4}$  доводят до разрушения. Для этого случая выражение (4) примет вид

$$n_{11} \frac{\sigma_4^m}{A} + n_{21} \frac{\sigma_5^m}{A} + n_{\lambda 4} \frac{\sigma_{\lambda 1}^m}{A} = 1. \quad (9)$$

Затем закрепляют пятый образец в точке *д* и при  $\sigma_{\lambda 1}$  за время  $T_{\lambda 5}$  доводят до разрушения. Для этого случая выражение (4) примет вид

$$n_{11} \frac{\sigma_5^m}{A} + n_{\lambda 5} \frac{\sigma_{\lambda 1}^m}{A} = 1. \quad (10)$$

Уравнения (5), (7) - (10) можно объединить в систему уравнений, из которой определяются  $n_{ij}$ , а затем для них сформировать уравнение вида (1)

$$\frac{n_{11}}{N_{11}} + \frac{n_{21}}{N_{21}} + \frac{n_{31}}{N_{31}} + \frac{n_{41}}{N_{41}} + \frac{n_{51}}{N_{51}} = P_g, \quad (11)$$

что соответствует накопленному повреждению исследуемого объекта за время  $T_g$  (то есть за время, когда образцы были жестко связаны с объектом).

Подставляя значения  $T_g$  и  $P_g$  из (11) в выражение (2) получаем общую долговечность исследуемого объекта.

**Выводы.** Предложенный в работе метод оценки долговечности агрегатов и конструкций может быть использован в случае наличия агрессивных сред и дает более достоверную информацию по сравнению с тензометрированием.

**Список литературы:** 1. Кузьменко В.А., Васинюк И.М., Крук Б.З. Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения. – Киев: Наукова думка, 1986. – 284 с. 2. Божко А.Е., Федоров А.И., Ляшенко В.И. Циклическая прочность и долговечность стальных сварных соединений осевых вентиляторов. – Проблемы машиностроения. – 1992 г. Вып. 37 – С. 27 – 32. 3. Божко А.Е., Белых В.И., Федоров А.И., Ляшенко В.И. Оценка влияния конструктивных и технологических изменений на циклическую прочность элементов конструкций. – Проблемы машиностроения. – 2000. – Т. 3, № 1-2. – С. 37 – 41. 4. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

*Поступила в редколлегию 13.09.2010*